

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>XI</b>
<b>Abstract</b>	<b>XIII</b>
<b>I. Einleitung</b>	<b>1</b>
1. Einsatz von Kartendaten und resultierende Herausforderungen	3
1.1. Fahrerassistenzsysteme und automatisches Fahren . . . . .	3
1.2. Welche Funktion haben Kartendaten im Automobil? . . . . .	5
1.3. Welche Kartendaten stehen zur Verfügung? . . . . .	7
1.4. Welche Herausforderungen stellt der Einsatz von Kartendaten? . . . . .	10
1.4.1. Kartenrelative Lokalisierung . . . . .	10
1.4.2. Kartenaktualisierung . . . . .	11
2. Zielsetzung, Methodik und Aufbau der Arbeit	13
2.1. Ziele der Arbeit . . . . .	13
2.2. Methodik . . . . .	14
2.3. Aufbau der Arbeit . . . . .	15
<b>II. Funktionale Systemarchitektur für ein autonom fahrendes Straßenfahrzeug</b>	<b>17</b>
3. Einleitung	19
3.1. Motivation zum Entwurf einer funktionalen Systemarchitektur . . . . .	19
3.2. Die Rolle von funktionalen Systemarchitekturen beim Entwurf komplexer Systeme . . . . .	19
3.3. Funktionale Anforderungen an ein autonom fahrendes Fahrzeug im öffentlichen Straßenverkehr . . . . .	20
3.4. Teilfunktionen in der funktionalen Systemarchitektur . . . . .	22

<b>4. Stand der Forschung</b>	<b>25</b>
4.1. Architekturen . . . . .	25
4.1.1. Der Mensch als Vorbild . . . . .	25
4.1.2. Automatisches Fahren . . . . .	27
4.1.3. Robotik . . . . .	34
4.2. Forschungsbedarf . . . . .	35
<b>5. Funktionale Systemarchitektur</b>	<b>37</b>
5.1. Gesamtarchitektur . . . . .	37
5.2. Absolute, globale Lokalisierung . . . . .	42
5.2.1. Verarbeitete Daten und Abnehmer . . . . .	42
5.2.2. Dateneingang . . . . .	42
5.2.3. Datenverarbeitung . . . . .	43
5.3. Externe Daten . . . . .	43
5.3.1. Verarbeitete Daten . . . . .	43
5.3.2. Dateneingang . . . . .	45
5.3.3. Abnehmer . . . . .	45
5.3.4. Datenverarbeitung . . . . .	45
5.4. Wahrnehmung . . . . .	47
5.4.1. Verarbeitete Daten . . . . .	47
5.4.2. Dateneingang . . . . .	48
5.4.3. Abnehmer . . . . .	48
5.4.4. Datenverarbeitung . . . . .	48
5.5. Missionsumsetzung . . . . .	55
5.5.1. Verarbeitete Daten . . . . .	55
5.5.2. Dateneingang . . . . .	55
5.5.3. Abnehmer . . . . .	56
5.5.4. Datenverarbeitung . . . . .	56
<b>6. Diskussion der funktionalen Systemarchitektur</b>	<b>61</b>
6.1. Allgemeine Betrachtungen . . . . .	61
6.1.1. Einsatz von A-Priori-Kartendaten . . . . .	61
6.1.2. Die Rolle von fahstreifengenauen Karten . . . . .	62
6.1.3. Einordnung der Lokalisierungslösungen . . . . .	62
6.1.4. Ansätze zur Prädiktion des dynamischen Umfelds . . . . .	63
6.1.5. Betrachtungsperspektiven der relativen Lokalisierung zwischen Welt und Fahrzeug . . . . .	64
6.1.6. Funktionale Redundanz . . . . .	65
6.2. Verifikation der funktionalen Systemarchitektur . . . . .	66

<b>7. Fazit</b>	<b>69</b>
7.1. Beitrag zum Stand der Forschung . . . . .	69
7.2. Ausblick . . . . .	69
7.3. Bedeutung für die nachfolgenden Untersuchungen . . . . .	70

### **III. Gitterbasierte Extraktion von Umfeldmerkmalen für den Abgleich mit fahstreifengenaue Kartendaten**

**73**

<b>8. Einleitung und Anforderungen</b>	<b>75</b>
8.1. Motivation . . . . .	75
8.2. Anforderungen an die Extraktion . . . . .	76
8.2.1. Einsatz in städtischer Umgebung . . . . .	77
8.2.2. Anforderungen durch nachfolgende Module . . . . .	78
8.3. Ansätze zur Sensordatenverarbeitung . . . . .	79
8.3.1. Gitterbasierte Umfeldrepräsentation . . . . .	79
8.3.2. Objektbasierte Umfeldrepräsentation . . . . .	80
<b>9. Stand der Forschung</b>	<b>83</b>
9.1. Ansätze zur Extraktion des Straßenverlaufs aus Laserdaten . . . . .	83
9.1.1. Extraktion aus Sensorrohdaten . . . . .	83
9.1.2. Extraktion aus gitterbasierter Repräsentation . . . . .	84
9.2. Bewertung der Ansätze und Ableitung des Forschungsbedarfs . . . . .	87
<b>10. Gitterbasierte Sensordatenverarbeitung</b>	<b>89</b>
10.1. Belegungsgitter für erhabene Randbebauung . . . . .	89
10.1.1. Vorverarbeitung und inverses Sensormodell für Laserdaten . . .	90
10.1.2. Behandlung von beweglichen Objekten . . . . .	91
10.2. Reflektanzgitter für Bodenpunkte . . . . .	92
10.2.1. Vorverarbeitung und inverses Sensormodell für Laserdaten . . .	92
10.2.2. Vorverarbeitung und inverses Sensormodell für Kameradaten . .	93
10.3. Belegungsgitter für Bodenpunkte . . . . .	96
10.4. Fusion von erhabenem Umfeld und Bodenstrukturen . . . . .	96
<b>11. Extraktion des Fahrbahnverlaufs</b>	<b>101</b>
11.1. Extraktion von Freibereichen, Belegtbereichen und Markierungen . . .	101
11.1.1. Verkettung von Straßenelementen . . . . .	101
11.1.2. Sequentielle Extraktion des Fahrbahnverlaufs . . . . .	102

11.2. Ermittlung der Umfeldmerkmale . . . . .	105
11.2.1. Ermittlung der Fahrbahnfluchten . . . . .	105
11.2.2. Ermittlung der Fahrstreifenmitten . . . . .	105
<b>12. Evaluierung und Referenzierung</b>	<b>107</b>
12.1. Versuchsträger und Testdaten . . . . .	107
12.2. Extraktion der Straßenfluchten . . . . .	109
12.2.1. Metriken . . . . .	109
12.2.2. Ergebnisse . . . . .	110
12.3. Extraktion der Fahrstreifenmitten . . . . .	112
12.3.1. Metriken . . . . .	112
12.3.2. Ergebnisse . . . . .	113
<b>13. Fazit</b>	<b>117</b>
13.1. Beitrag zum Stand der Forschung . . . . .	117
13.2. Ausblick . . . . .	118
13.3. Bedeutung für die nachfolgenden Untersuchungen . . . . .	119
 <b>IV. Wahrnehmungsgestützte Lokalisierung in fahr- streifengenaue Karten</b>	 <b>121</b>
<b>14. Einleitung und Definition der Anforderungen</b>	<b>123</b>
14.1. Anwendungsfälle für Kartendaten . . . . .	123
14.2. Herleitung der Anforderungen . . . . .	124
<b>15. Stand der Forschung</b>	<b>129</b>
15.1. Strategische Ebene . . . . .	129
15.1.1. Rein ortungsbasierter Abgleich . . . . .	130
15.1.2. Abgleich gestützt durch Umfeldmerkmale . . . . .	130
15.2. Taktische Ebene . . . . .	131
15.2.1. Rein ortungsbasierter Abgleich . . . . .	131
15.2.2. Abgleich gestützt durch Umfeldmerkmale . . . . .	132
15.3. Operative Ebene . . . . .	133
15.3.1. Rein ortungsbasierter Abgleich . . . . .	133
15.3.2. Abgleich gestützt durch Umfeldmerkmale . . . . .	134
<b>16. Einordnung der Lokalisierungslösungen</b>	<b>137</b>
16.1. Identifikation der unterschiedlichen Lokalisierungslösungen . . . . .	137

16.2. Lokale Poseschätzung . . . . .	140
16.3. Lokale Kartenposeschätzung . . . . .	141
16.4. Globale Poseschätzung . . . . .	141
16.5. Globale Kartenposeschätzung . . . . .	142
16.6. Diskussion der Lokalisierungsarchitektur . . . . .	143
<b>17. Filtermechanismen</b>	<b>147</b>
17.1. Kalman-Filter . . . . .	147
17.2. Extended-Kalman-Filter . . . . .	150
<b>18. Schätzen der Pose in digitalen Karten</b>	<b>153</b>
18.1. Modulare Lösung zur Stützung der Orientierung . . . . .	154
18.1.1. Abgleich der Fluchten aus Kartendaten mit Umgebungsmerkmalen	155
18.1.2. Der Filterprozess . . . . .	156
18.1.3. Theoretische Diskussion . . . . .	159
18.1.4. Verhalten bei GPS-Ausfall . . . . .	159
18.2. Integrierte Poseschätzung mittels Extended-Kalman-Filter . . . . .	160
18.2.1. Abgleich der Fahrstreifenmitten aus Kartendaten mit Umgebungsmerkmalen . . . . .	161
18.2.2. Der Filterprozess . . . . .	161
18.2.3. Theoretische Diskussion . . . . .	163
18.2.4. Verhalten bei GPS-Ausfall . . . . .	164
<b>19. Evaluierung und Referenzierung</b>	<b>165</b>
19.1. Versuchsträger . . . . .	165
19.1.1. Versuchsträger „Leonie“ . . . . .	165
19.1.2. Seriennaher Versuchsträger . . . . .	166
19.2. Metriken . . . . .	167
19.3. Ansatz 1: Stützen der Orientierung mittels Kalman-Filter . . . . .	168
19.3.1. Evaluierung mit dem Versuchsträger „Leonie“ . . . . .	168
19.3.2. Evaluierung mit einem seriennahen Versuchsträger . . . . .	175
19.4. Ansatz 2: Abgleich der Fahrstreifenmitten mittels EKF . . . . .	176
19.4.1. Evaluierung mit dem Versuchsträger „Leonie“ . . . . .	177
19.4.2. Evaluierung mit einem seriennahen Versuchsträger . . . . .	183
<b>20. Fazit</b>	<b>185</b>
20.1. Abgleich der Fluchten . . . . .	185
20.2. Abgleich der Fahrstreifenmitten . . . . .	186
20.3. Beitrag zum Stand der Forschung . . . . .	187
20.4. Ausblick . . . . .	187

<b>V. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>189</b>
<b>21. Zusammenfassung</b>	<b>191</b>
21.1. Funktionale Systemarchitektur . . . . .	191
21.2. Modellierung des stationären Umfelds und Fahrbahnextraktion . . . . .	191
21.3. Lokalisierung . . . . .	192
<b>22. Weiterführende Forschungsaktivitäten</b>	<b>193</b>
22.1. Umfeldwahrnehmung und Szenenmodellierung . . . . .	193
22.2. Lokalisierung und externe Daten . . . . .	194
22.3. Missionsumsetzung . . . . .	195
<b>Glossar</b>	<b>197</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>203</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>205</b>